

Раздел 7. Измерение параметров спектра радиосигналов

7.1. Общие вопросы измерения спектра радиосигналов

Как известно, есть две формы представления сигналов – временная и частотная. Временную форму позволяют наблюдать осциллографы, а частотную – анализаторы спектра. Исторически сложилось частотное разделение радиосигналов, основанное на их спектральном представлении. В настоящее время эфир переполнен радиосигналами со множеством частот, что требует непрерывного контроля их спектров.

В последнее время наблюдается интенсивный процесс освоения СВЧ диапазонов волн – с частотами до единиц, десятков и даже сотен ГГц. Они используются как в бытовых устройствах (например, в микровольновых печах и сотовых телефонах), так и в устройствах специального и военного назначения. Достаточно отметить радиолокацию, системы посадки и прицеливания самолетов, спутниковое и кабельное телевидение, спутниковую и сотовую связь, WiFi, WiMax и Bluetooth беспроводные устройства и сети, системы глобального позиционирования, системы радиочастотной идентификации, прослушивающие устройства («жучки») и устройства их подавления и т.д. Интенсивно развиваются скрытые системы связи со сверхширокополосными и шумоподобными СВЧ-сигналами, со сложными и изменяющимися во времени спектрами.

Наблюдение формы сигнала не всегда позволяет получить полную информацию о нем. Так, осциллограмма ЧМ-радиосигнала с небольшой девиацией частоты на вид мало отличается от осциллограммы гармонического сигнала (рисунок 7.1, а). Малые нелинейные искажения синусоидального колебания соответствуют наличию в составе сигнала дополнительных гармонических составляющих, которые маскируются большим значением гармоники несущей частоты и могут быть выделены только с использованием спектрального анализа (рисунок 7.1, б).

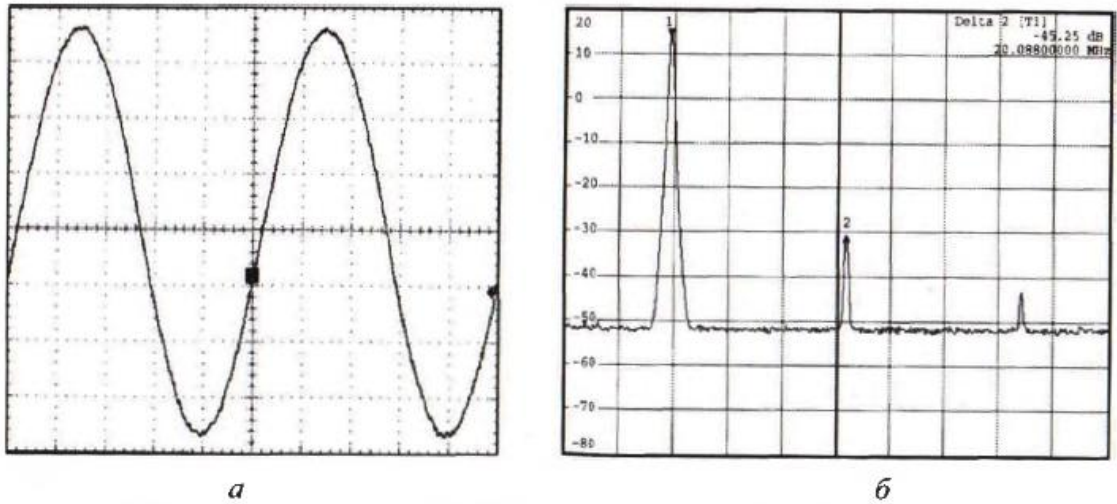


Рисунок 7.1 – Сигнал на экране приборов: а – осциллограмма; б – спектрограмма.

По этой причине анализ спектральных характеристик радиосигналов часто более информативен и позволяет достаточно точно измерить такие параметры радиосигнала, как мощность, частоту, коэффициент модуляции и пр.

Напомним наиболее распространенные спектральные характеристики радиосигнала. Для одиночного сигнала $u(t)$ в частотной области используют спектральную функцию (или спектральную плотность, В/Гц), определяемую прямым преобразованием Фурье:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-i\omega t} dt.$$

Эта функция комплексная и представляет собой распределение амплитуд и фаз гармонических составляющих по частотной оси. Спектральная функция существует при абсолютной интегрируемости функции сигнала. Для реальных сигналов это условие обычно всегда выполняется.

Спектральная функция - это функционал уже закончившегося процесса (интеграл берется до «бесконечного» времени). В реальных условиях измерить можно только текущий частотный спектр, характеризующий незаконченный процесс:

$$S(\omega, t) = \int_{-\infty}^t u(t)e^{-i\omega t} dt.$$

Спектральный анализ должен обеспечивать время интегрирования (время анализа) много больше длительности сигнала (а для периодических сигналов - значительно больше их периода). В противном случае вместо полного спектра получим текущий спектр, зависящий от времени.

Чаще измеряют модуль этого выражения - его называют амплитудной спектральной функцией, или, проще, амплитудным спектром сигнала. Приборы, которые позволяют измерить амплитудный спектр, называют анализаторами спектра (АС). Фазу измерить сложнее, поэтому в стандартных измерительных задачах этого обычно не делают. Фазовый спектр необходим при исследовании сигналов со сложными видами модуляции. Приборы, регистрирующие как модуль, так и фазу спектральной функции, называют векторными анализаторами спектра. В них используют цифровые технологии обработки сигнала (вычислительные спектроанализаторы).

Особый класс сигналов - шумовые и случайные (неповторяющиеся) сигналы большой длительности (к ним относятся реальные информационные сигналы). Важной характеристикой такого сигнала является его спектральная плотность мощности, $W^2 \cdot \text{с}$:

$$W(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|S(\omega, T)|^2}{T}.$$

Здесь $S(\omega, T)$ - спектральная плотность реализации случайного процесса на интервале $[-T/2, T/2]$. Единицы измерения спектральной плотности мощности такие же, как у энергии сигнала, поэтому иногда говорят об энергетическом спектре случайного сигнала. Фактически это характеристика распределения мощности случайного сигнала по частоте.

На рисунке 7.2 представлен результат спектрального анализа шумового сигнала, ограниченного по полосе. На рисунке 7.3 можно видеть осциллограмму и спектр мощности бинарной последовательности импульсов со случайным кодом.

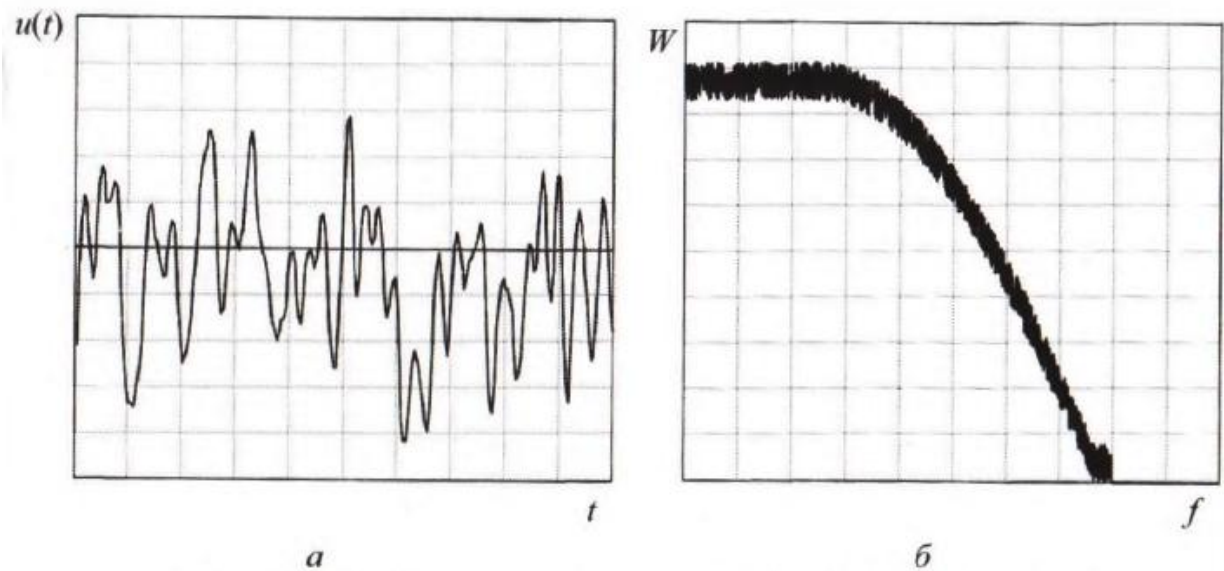


Рисунок 7.2 – Шумовой сигнал: а – осциллограмма; б – спектрограмма.

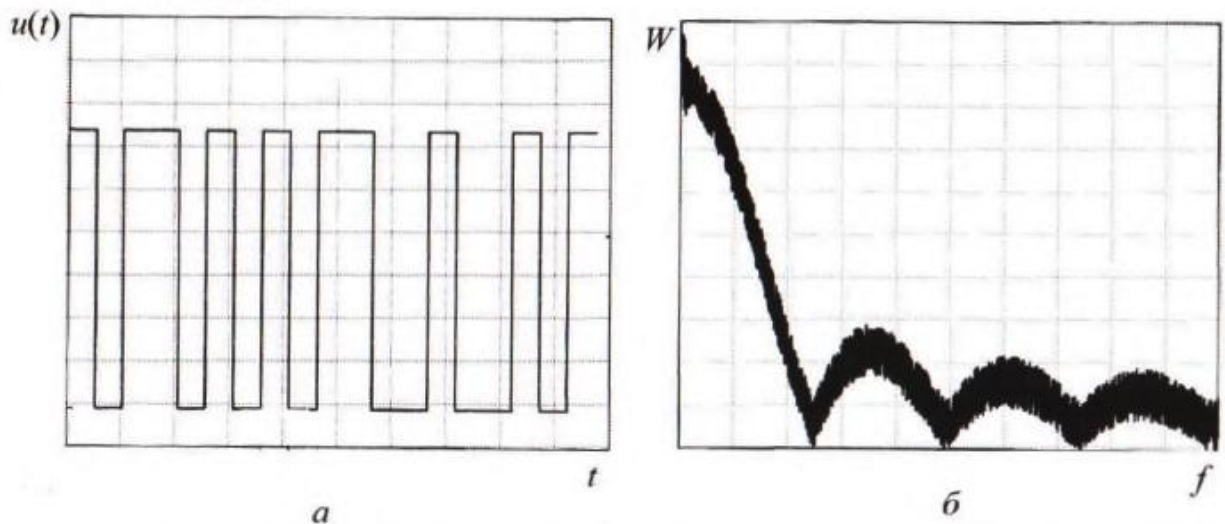


Рисунок 7.3 – Случайная последовательность прямоугольных импульсов (бинарный цифровой сигнал): а – осциллограмма; б – спектрограмма.

Для периодических сигналов спектральная функция представляет собой последовательность дельта-функций, смещенных друг относительно друга на частоту повторения сигнала (линейчатый спектр). В этом случае удобно использовать спектральное представление сигнала в виде ряда Фурье:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t + \varphi_n\right),$$

где T – период повторения сигнала ($u(t \pm kT) = u(t)$, $k=0,1,2,3,\dots$).

Этот ряд представляет собой совокупность гармонических колебаний с кратными частотами. Составляющая с нулевой частотой U_0 является постоянной составляющей сигнала (напомним, что ее измеряют вольтметрами постоянного тока). Последовательность $\{U_n\}$ называют амплитудным спектром, V ; последовательность $\{\varphi_n\}$ - фазовым спектром, ...^о или рад.

Для представления спектра часто используют графическую форму представления сигнала в виде вертикальных линий, высота которых равна амплитуде гармоники, а расположение по горизонтальной оси - частоте (рисунок 7.4).

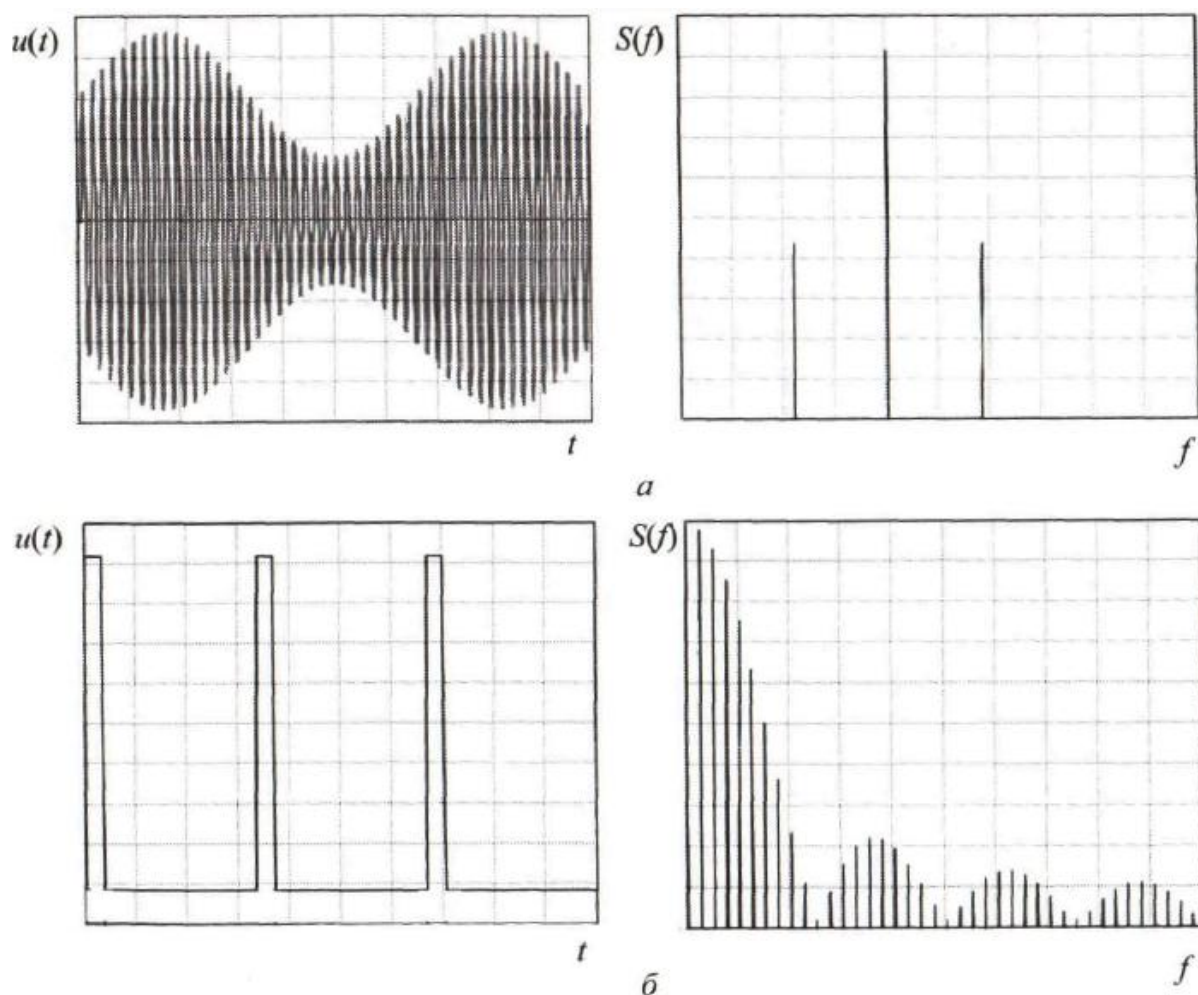


Рисунок 7.4 – Осциллограммы и графическое представление спектров: а – радиосигнал с АМ; б – последовательность прямоугольных импульсов.

К основным задачам спектрального анализа сигналов относятся:

- определение амплитуд и частот гармонических составляющих периодических сигналов;
- измерение амплитудной спектральной функции одиночных сигналов;
- измерение спектральной плотности мощности случайных сигналов.

Во многих случаях, учитывая сложности фазовых измерений, при анализе ограничиваются амплитудными измерениями. Количество одновременно измеряемых сигналов не ограничивается - часто приходится исследовать суперпозицию спектров различных сигналов. При этом гармонические составляющие входных сигналов могут быть некратны по частоте (на практике их также называют гармониками).

Классификация методов измерения спектров сигналов представлена на рисунке 7.5. Все методы и средства спектрального анализа делятся на две группы - аналоговые и цифровые (вычислительные) методы. Аналоговые методы, как правило, используют узкополосную фильтрацию сигнала для выделения гармонических составляющих. Вычислительные методы включают оцифровку сигнала и расчет спектра с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Спектроанализаторы различают по верхней граничной частоте рабочего диапазона. Приборы диапазона НЧ - примерно до частоты 1 МГц - используют для анализа сигналов низкочастотной электроники, акустики и механики. Спектроанализаторы диапазона ВЧ (до 3 ГГц) необходимы при разработках систем мобильной связи, радиотехнических устройств, аппаратуры радиовещания и телевидения и пр. Приборы для диапазона СВЧ (микроволновый диапазон - до 40 ГГц и диапазон миллиметровых волн - свыше 40 ГГц) применяются в широкополосных линиях связи, радиорелейных и спутниковых каналах передачи цифровой информации и пр.



Рисунок 7.5 – Классификация методов и средств спектрального анализа.

По принципу действия спектроанализаторы делятся на параллельные и последовательные. Параллельные АС позволяют производить анализ спектра одновременно во всей полосе частот. Конструктивно их реализуют, используя набор аналоговых или цифровых фильтров.

Последовательные АС основаны на сканировании диапазона частот перестраиваемым узкополосным фильтром. Перестройка может быть как ручной (такие приборы называют анализаторами гармоник, селективными вольтметрами), так и автоматической (с электронным управлением). В последнем случае используют панорамный метод представления результатов анализа спектра на экране осциллографического индикатора. Спектроанализаторы последовательного типа - это наиболее распространенные приборы частотного анализа в диапазонах ВЧ и СВЧ, структура которых и будет рассмотрена далее.

7.2. Анализатор спектра последовательного типа

Упрощенная структурная схема анализатора последовательного типа показана на рисунке 7.6.

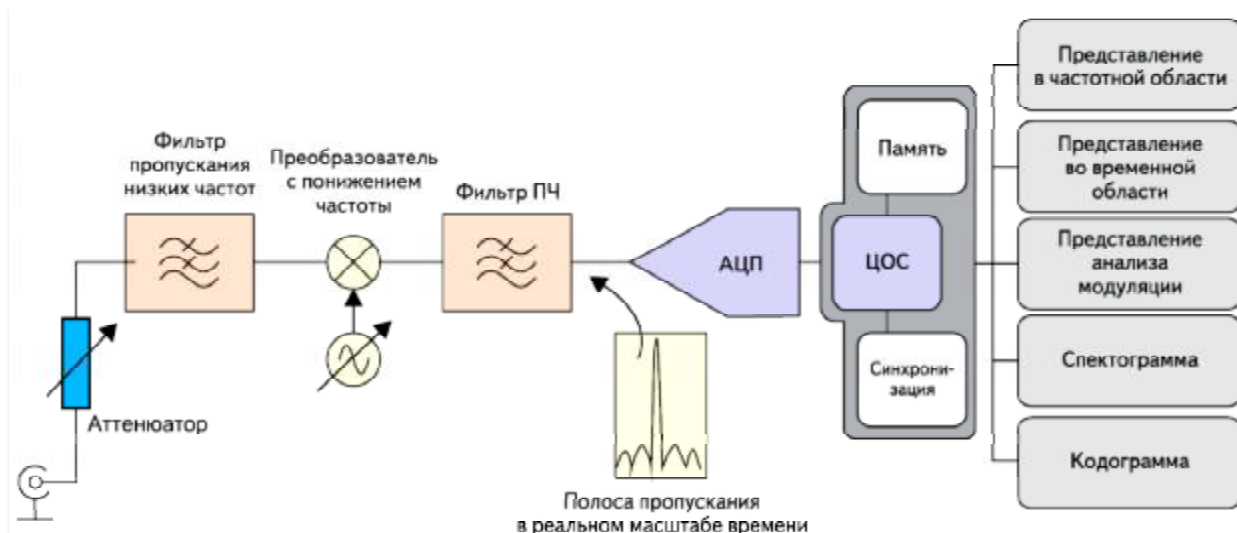


Рисунок 7.6 – Структурная схема анализатора спектра последовательного типа.

Основой прибора является преобразователь супергетеродинного типа, переводящий спектр исследуемого сигнала в область промежуточной частоты (ПЧ). Аттенюатор служит для ослабления сигнала. Фильтр низких частот и смеситель с гетеродином преобразуют часть области частот исследуемого сигнала в область промежуточных частот ПЧ. Фильтр ПЧ формирует нужную полосу обзора. Ее можно перемещать по диапазону частот анализатора изменением частоты гетеродина. Гетеродин построен на основе высокоточного и высокостабильного цифрового синтезатора частоты.

У аналоговых анализаторов спектра сигнал ПЧ детектируется тем или иным детектором (линейным, квадратичным, среднеквадратическим и т. д.). Это ведет к некоторому различию спектров в зависимости от выбранного детектора. В анализаторе спектра с помощью АЦП и блока памяти сигнал ПЧ оцифровывается, запоминается и детектируется цифровым детектором.

Группы кадров (рисунок 7.7) — блоки — подвергаются цифровой обработке сигналов (ЦОС) с применением короткого оконного преобразования Фурье. При нем анализируемый участок спектра

последовательно просматривается коротким окном и строится спектрограмма сигнала в плоскости «время-частота» с представлением амплитуды цветом (рисунок 7.8). Напомним, что в обычных анализаторах спектр строится в плоскости «амплитуда-частота». Он непригоден для анализа нестационарных сигналов и не дает привязки компонентов спектра ко времени.

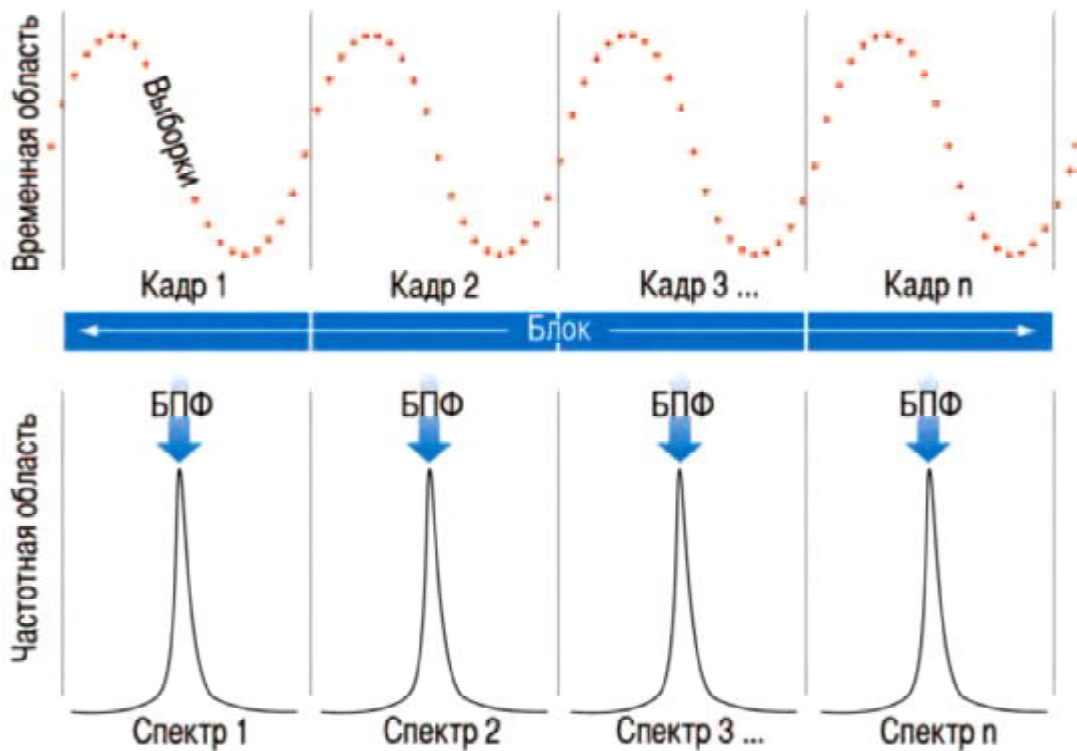


Рисунок 7.7 – Выборки, кадры и блоки: иерархия памяти анализатора спектра.

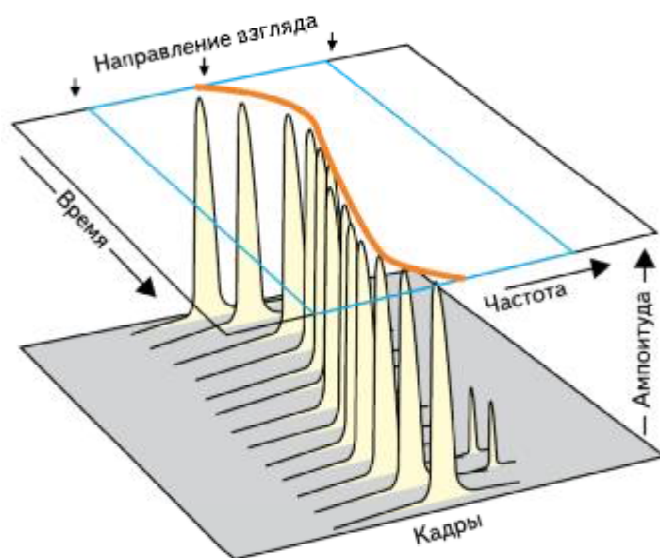


Рисунок 7.8 – Принцип построения спектрограммы с применением короткого оконного преобразования Фурье.

Применение короткого оконного Фурье-преобразования, высокоскоростная оцифровка, хранение спектров реального времени в памяти и применение технологии цифрового фосфора (имитации послесвечения электронно-лучевой трубки) — все это особенности современных анализаторов спектра. Цифровая часть прибора способна обрабатывать до 48 тысяч кадров (спектров в секунду). Становится возможным анализ нестационарных сигналов с изменяемыми во времени параметрами, например, скачущей во времени частотой.

В правой части структурной схемы анализатора (см. рисунок 7.6) представлен ряд (далеко не полный) программных средств обработки оцифрованного спектра, позволяющих не только «выжать» из исходного спектра многочисленные его особенности, но и представить их на экране цветного ЖКИ в том или ином виде, например, спектрограммы, кодограммы, звездной диаграммы и т. д. Возможен анализ различных видов модуляции.

Анализаторы спектра обеспечивают синхронизацию по радиосигналам и по тем или иным событиям в них, быстрое оконное преобразование Фурье, дискретизацию и запоминание текущего спектра, просмотр спектра в заданном диапазоне частот, выявление особенностей модуляции радиосигналов, построение специальных спектров и спектрограмм в реальном масштабе времени, выявление различных нестабильностей спектра (в том числе быстрого его изменения) и множество других возможностей.

7.3. Основные параметры спектроанализаторов

1. *Рабочий диапазон частот* - это тот частотный диапазон, в котором работает данный прибор. Рабочий диапазон может быть разбит на поддиапазоны.

2. *Полоса обзора (полоса анализа)* - это диапазон частот, в котором производится обзор спектра сигнала за один ход развертки. Может регулироваться от максимальной полосы до нуля. В последнем случае спектроанализатор превращается в измерительный приемник с ручной перестройкой частоты.

3. *Время анализа (время обзора)* - это время, за которое спектроанализатор перестраивается в пределах полосы обзора. Может регулироваться в широких пределах (от единиц миллисекунд до десятков секунд и более). Если в АС предусмотрен ручной режим перестройки по частоте, то время анализа не ограничено. Этот режим используют при работе с особо узкими полосами УПЧ.

4. *Разрешающая способность* - минимальная разность частот двух спектральных составляющих, при которой они фиксируются отдельно и могут быть измерены. Численно задается разностью частот двух гармоник U_1 и U_2 , которые на экране создают изображение откликов, пересекающихся на заданном заранее уровне. Обычно используют спад до уровня 0.707 (-3 дБ) от амплитуд откликов, реже до уровня 0.5 (-6 дБ).

Отметим, что разрешающая способность показывает лишь возможность визуально различить отклики. На точности измерения амплитуд и частот гармоник она сказывается только при большой ширине откликов.

5. *Чувствительность* - это минимальный уровень входного синусоидального сигнала, который может быть измерен на экране спектроанализатора с заданной точностью. Чувствительность ограничена, как правило, внутренними шумами прибора. Количественно она оценивается как минимальное значение синусоидального сигнала, при котором его отклик

превышает уровень шумов на экране прибора в заданное число раз (например, на 20 дБ). В технических параметрах АС указывают уровень собственных шумов прибора, который позволяет оценить чувствительность по любому отношению сигнал/шум.

6. *Максимальный уровень входного сигнала* определяется уровнем допустимых искажений исследуемого спектра при воздействии сигнала на входные активные блоки прибора. При перегрузках большим сигналом в спектрограмме появляются дополнительные паразитные составляющие, а амплитуды существующих откликов могут измениться.

7. *Динамический диапазон* - это соотношение максимального и минимального уровней гармоник, при котором искажения спектрограммы за счет нелинейности АС пренебрежимо малы. Не следует путать это понятие с диапазоном измеряемых амплитуд сигнала, который при использовании входного аттенюатора может быть существенно больше, чем динамический диапазон. Присутствие в реальных сигналах больших и малых уровней гармоник предъявляет жесткие требования к динамическому диапазону. Как правило, он определяется нелинейностью входных блоков спектроанализатора (смесителя, усилителя и пр.). Современные спектроанализаторы имеют высокий динамический диапазон (90... 120 дБ и более).

8. *Селективность по побочным каналам приема* характеризуется степенью подавления сигнала на частоте зеркального канала прохождения сигнала. Этот параметр зависит от свойств входного фильтра и значения первой промежуточной частоты АС.

9. *Амплитудно-частотная характеристика* - это зависимость измеренной амплитуды гармоники от изменения ее частоты в пределах полосы обзора при постоянной амплитуде на входе. Она определяет систематическую погрешность при измерении спектров в широком диапазоне частот.

10. *Метрологические параметры АС* - это погрешности измерения уровня гармоник и частоты гармоники. Погрешность измерения амплитуды включает погрешность калибровки на фиксированной частоте и погрешность неравномерности собственной АЧХ, погрешность калиброванного аттенюатора и пр. Погрешность измерения частоты определяется точностью калибровки шкалы, точностью совмещения метки с выбранной точкой спектрограммы, погрешностью частотомера.

Современные анализаторы спектра последовательного типа имеют широкие рабочие диапазоны частот (до единиц и десятков гигагерц), минимальные полосы пропускания УПЧ - от десятков герц до единиц килогерц, малый уровень собственных шумов и обеспечивают значительный динамический диапазон (130... 150 дБ). Точность измерения амплитуды 0.5...2 дБ, погрешность измерения частоты 10^{-3} ... 10^{-6} .

7.4. Измерения в области модуляции

Исследование спектров сигналов с различными видами модуляции — одно из основных и важных применений анализаторов спектров.

7.4.1. Анализ аналоговой модуляции

Режим аналоговой демодуляции обеспечивает демодуляцию и анализ сигналов с амплитудной модуляцией (рисунок 7.9), частотной модуляцией (рисунок 7.10) и фазовой модуляцией (рисунок 7.11).

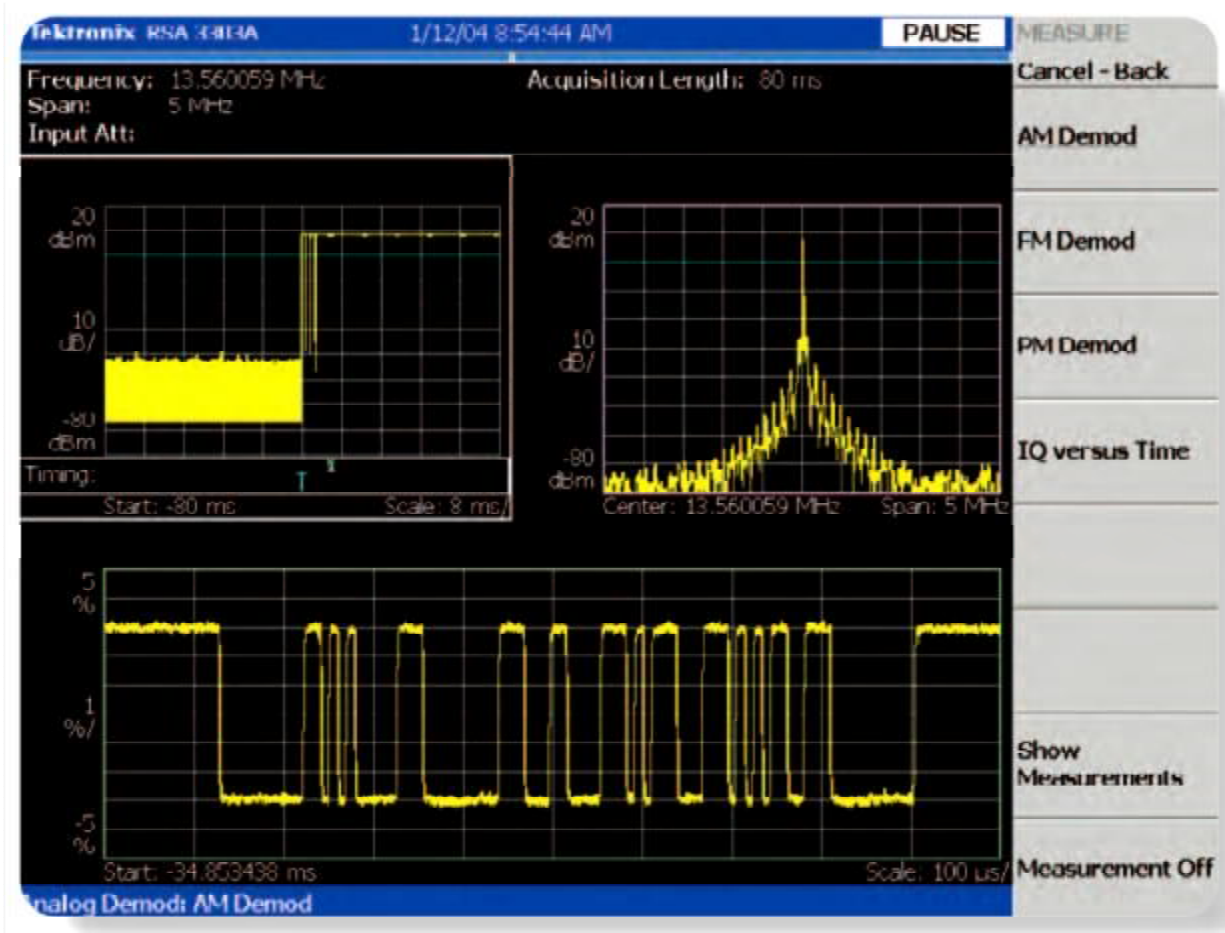


Рисунок 7.9 - Анализ демодуляции импульсного АМ-сигнала с использованием модуляции с амплитудной манипуляцией для кодирования данных.

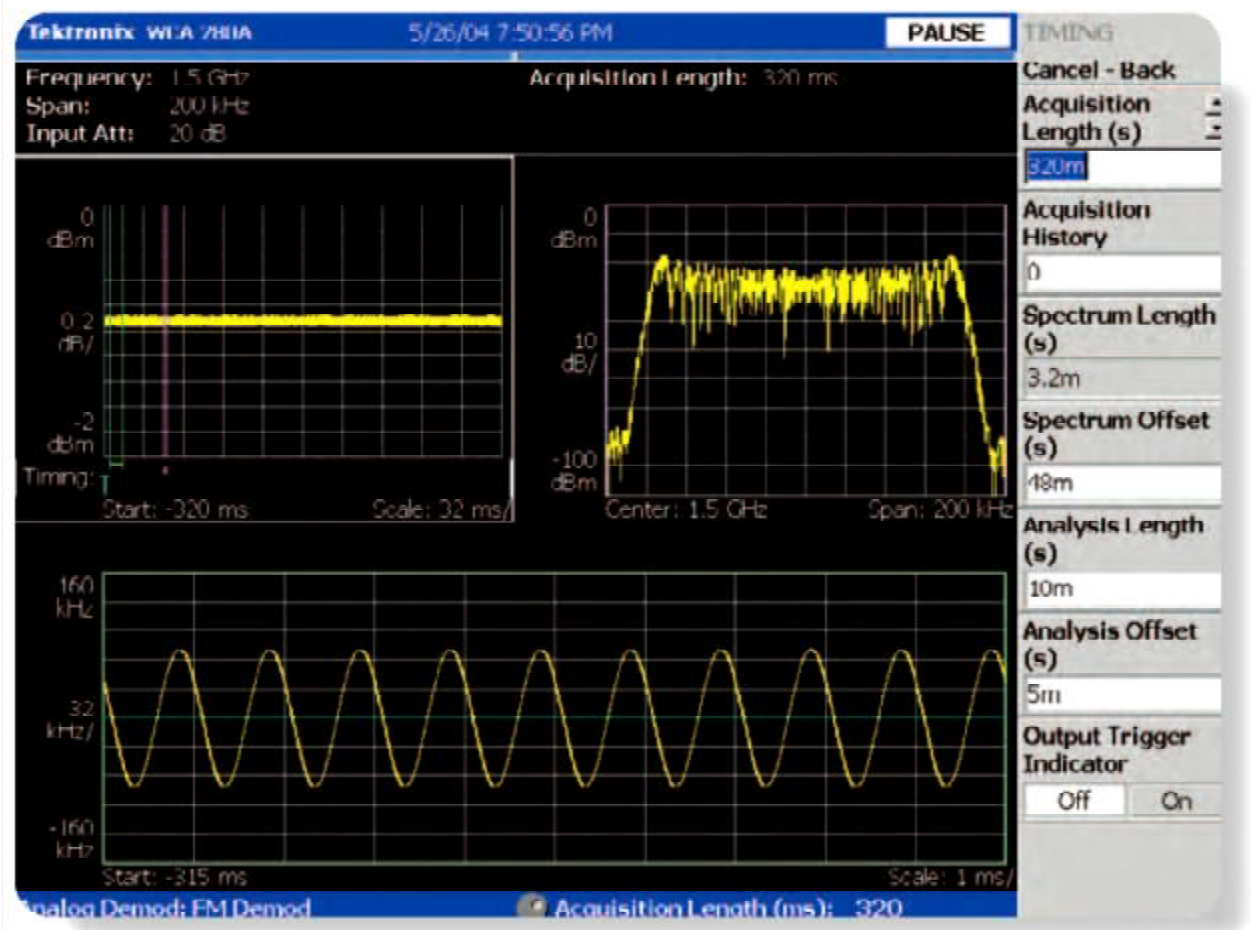


Рисунок 7.10 – Анализ демодуляции ЧМ-сигнала, модулируемого синусоидальным сигналом.

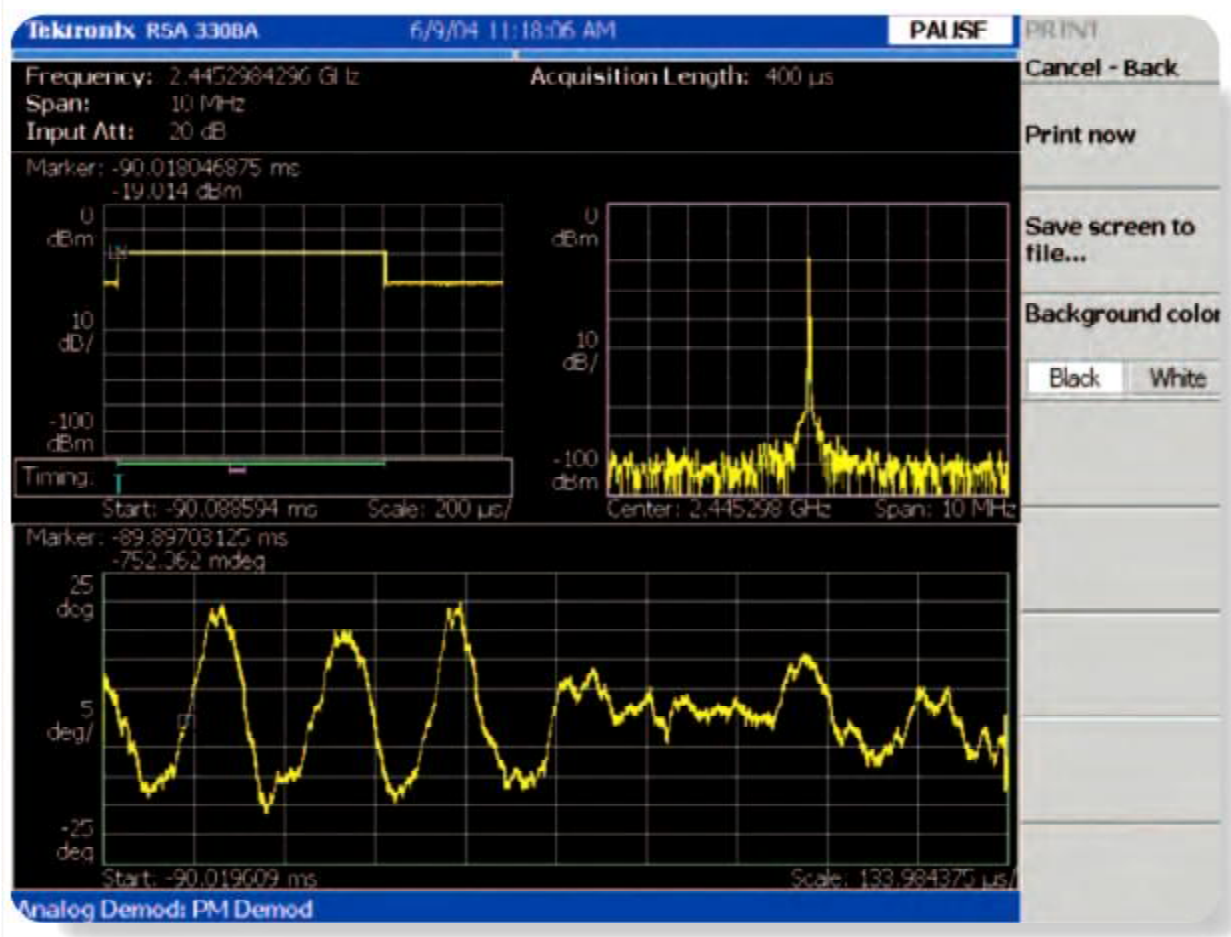


Рисунок 7.11 – Анализ демодуляции ФМ-сигнала, показывающий фазовую нестабильность во время продолжительного импульса.

7.4.2. Анализ цифровой модуляции

В режиме цифровой демодуляции производится демодуляция и анализ многих распространенных видов цифровых сигналов на основе фазовой манипуляции, модуляции с частотной манипуляцией и квадратурной амплитудной модуляции. Анализатор спектра (векторный анализатор) обеспечивает проведение разнообразных измерений, в том числе:

- диаграмма «созвездие»;
- величина вектора ошибок;
- ошибка амплитуды;
- ошибка фазы;
- демодулированные сигналы I/Q во времени;
- таблица символов;
- глазковая диаграмма.

Для выполнения этих измерений необходимо соответствующим образом настроить такие переменные как тип модуляции, частоту символов, тип фильтра измерений (фильтра приемника) и параметр (α/BT), а также тип опорного фильтра.

Примеры экранов спектроанализатора показаны на рисунках 7.12 – 7.14.

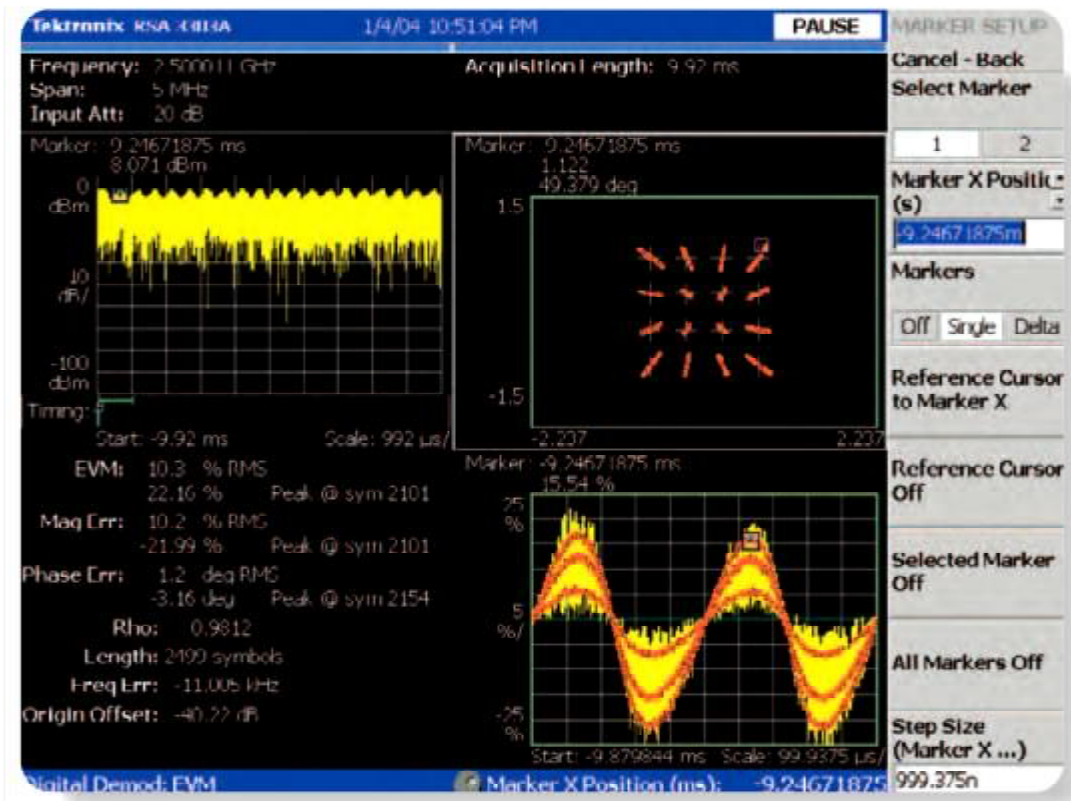


Рисунок 7.12 – Анализ поведения модуля ошибки во времени для сигнала квадратурной модуляции 16QAM позволяет выявить синусоидальные возмущения амплитуды.

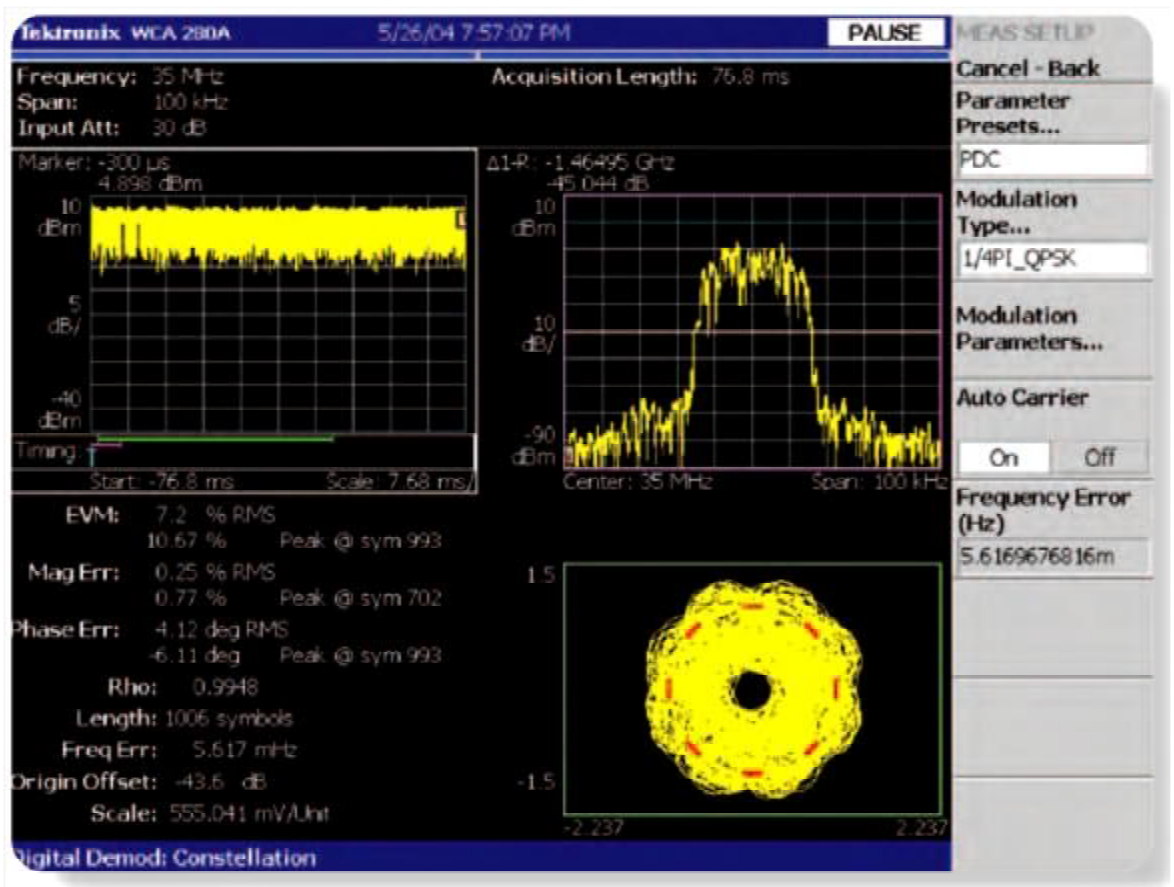


Рисунок 7.13 – Диаграмма «созвездие», на которой показана фазовая нестабильность в сигнале

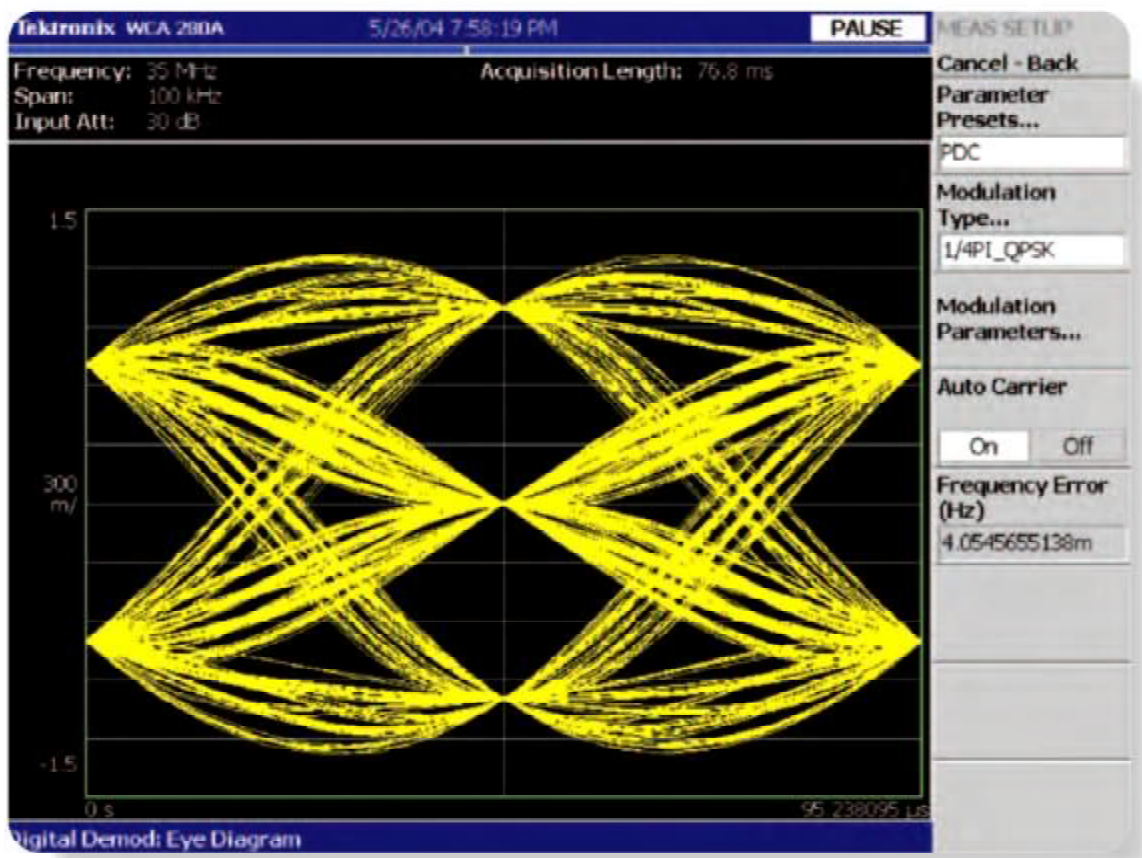


Рисунок 7.14 – Глазковая диаграмма, на которой показана небольшая амплитудная ошибка в сигнале.